بیست و هفتمین همایش سالانه بین المللی مهندسی مکانیک و
هفتمین کنفرانس صنعت نیروگاه های حرارتی
12-10 اردیبهشت 1398، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

ISME2019-2019

بررسی یک نمونه گیربکس مغناطیسی هم‌محور در نمونه ایده‌آل و نمونه قابل ساخت به کمک نرم‌افزار المان محدود

رسول لطفی[1]، علی جباری[2]، حسن مرادزاده[3] ، علی‌اصغر قدیمی [4]

[1]دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، rasullotfi87@gmail.com
[2]استادیار، مهندسی مکانیک –ساخت و تولید، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک،a-jabbari@araku.ac.ir
[3] استادیار، برق الکترونیک، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی برق، hmoradzadeh@gmail.com
[4] دانشیار، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی برق، a-ghadimi@araku.ac.ir

چکیده

با توجه به رشد تعداد مقالات و تعامل بیشتر درزمینهٔ چرخ‌دنده‌های نوظهور مغناطیسی، توجه به نمونه‌های قابل ساخت و بررسی آن با نمونه‌های کلاسیک و ایده آل قبلی به جهت دانستن کارایی و بررسی بازدهی این نوع چرخ‌دنده‌ها یکی از موضوعات مهم علمی می‌باشد.
البته این نوع جعبه‌دنده‌ها دارای مزایای بسیاری نیز می باشند من جمله عدم وجود خرابی ناشی از خوردگی، بی‌نیاز به روغن کاری، صدای کم، فرار از گشتاور شکست و دوست دار محیط زیست. همچنین بیشترین کاربردهای پیشنهاد شده برای این جعبه‌دنده‌ها استفاده در توربین های بادی، خودروهای هیبریدی و سیستم های دفع و بازیابی انرژی نو دریایی بوده است.
در این مقاله یک نمونه چرخ‌دنده هم‌محور مغناطیسی ایده آل را با یک نمونه قابل ساخت (با توجه به شکل و جهت‌گیری مغناطیسی آهن‌رباهای موجود در بازار) مورد ارزیابی قرار گرفته‌شده است.
شرایط آزمایش به‌گونه‌ای تعیین گردیده است تا خصوصیاتی چون نسبت دنده، حجم و نوع آهن‌ربا و نوع حرکت یکسان باشد و تفاوت مورد ارزیابی جهت پلاریته شعاعی با مسطح خواهد بود، همچنین محیط نرم‌افزار المان محدود Ansys Maxwell است.
نتایج حاصله در دو حالت ایستایی و دینامیکی شبیه‌سازی خواهند شد تا شار انتقالی و گشتاور خروجی، نتایج بررسی را مشخص کنند.
در نهایت نمونه قابل ساخت نتایج بهتری از نمونه‌های کلاسیک و ایده آل ارائه می‌نماید.

واژه‌های کلیدی

چرخ‌دنده مغناطیسی – کوپل مغناطیسی - روش المان محدود – آهن‌ربا دائم

مقدمه

یکی از اساسی‌ترین بخش‌های هر سیستم قدرت دینامیک، بخش چرخ‌دنده آن می‌باشد و امروزه در طیف گسترده از وسایل ازجمله وسایل خانگی تا نیروگاه‌های مگاواتی بکار برده می‌شوند. از طرفی با ظهور آهن‌رباهای مغناطیسی قوی، بحث ربایش مغناطیسی و کوپل مغناطیسی شاهد پدید آمدن دسته‌ای جدید از گیربکس‌های مغناطیسی هستیم.
اولین بار نمونه اولیه این چرخ‌دنده‌های مغناطیسی توسط تسورینوتو و کیکوچی ارائه گردید، البته این طراحی شامل دوچرخ دنده مغناطیسی غیر هم‌مرکز و با شعاع‌های مختلف بود که بدون تماس فیزیکی و با استفاده از ربایش مغناطیسی نیرو را با ضریب دنده خاص انتقال می‌داد. [1]
در ادامه انواع مختلف این چرخ‌دنده‌ها معرفی گردید که شامل انواع چرخ‌دنده ساده، مارپیچی، شانه‌ای، مخروطی و حلزونی مغناطیسی بودند. از معایب این چرخ‌دنده‌ها همانند نمونه مکانیکی آن ربایش تعداد کمی از آهن‌رباها باهم و گشتاور کم آن‌ها بود، در طراحی‌های بعدی چرخ‌دنده‌هایی با جانمایی هم‌محور[1]، هارمونیک[2] و سیاره‌ای[3] ارائه گردید که دارای گشتاور بیشتری بودند. [2]
نمونه هم‌مرکز دارای دو روتور داخلی[4] و خارجی[5] و یک مدولاتور[6] هست، نمونه‌های هم‌مرکز به جهت آسانی فرآیند ساخت، بیشتر موردتوجه قرارگرفته‌اند. همچنین در سال‌های اخیر در این زمینه تلاش‌هایی به جهت بهبود کارایی آن‌ها صورت پذیرفته است،ازجمله تحقیق در مورد شکل و جهت‌گیری آهن‌رباها ، نوع آهن‌ربا و شکل ابعادی مدولاتور بوده است. راسموسن و همکاران نمونه قابل ساختی را ارائه نمودند که در آن از آهن‌رباهای شعاعی نبوده است البته این تحلیل فقط جنبه تحلیل عددی و تجربی یک طرح را بررسی نموده است. [3] فرانک و همکاران در سال‌های بعدی نمونه‌ای ارائه نمودند که روتور داخلی آن دارای آهن‌ربای تخت و روتور خارجی دارای آهن‌ربای شعاعی بود، ولی با مدل کلاسیک پایه آن مقایسه نشده است[4]

[1] Concentric
[2] Harmonic
[3] Planetary
[4] Inner pole-per rotor
[5] Outer pole-per rotor
[6] Pole-pieces stator

در طرح قابل ساخت فرانک و تولیت به‌جای استفاده از یک بلوک بزرگ آهن‌ربا از چند آهنربای بلوکی کوچک استفاده شده که این خود یک نوآوری بود و در راستای ارزان‌سازی قابل‌بحث و تحقیق است. [5] اما همواره این تلاش‌ها در نمونه‌های ایده آل و کلاسیک بوده و یا هیچ‌گونه تصویر مقایسه‌ای از عملکرد یک طراحی قابل ساخت با نمونه کلاسیک آن وجود نداشته است. ازاین‌رو در این مقاله ابتدا یک طرح قابل ساخت را طراحی می‌نماییم و از روی ابعاد آن و با توجه به حجم آهن‌ربای استفاده‌شده طرح ایده‌آل آن را برای بررسی بیشتر مدل می‌نماییم.

نکته: نمونه قابل ساخت، نمونه‌ای که با توجه به نوع و شکل آهن‌رباهای موجود در بازار و نه انواع سفارشی آن ساخته‌شده است، می‌باشد.

شرح مسئله

نمونه هم‌مرکز دارای دو روتور داخلی و خارجی و یک مدولاتور می‌باشد و بسته به نوع دارای دو نوع حرکت کلی است: حالت اول، روتور داخلی به همراه روتور خارجی در خلاف جهت یکدیگر حرکت نمایند و مدولاتور ثابت باشد. حالت دوم، روتور داخلی و یا خارجی به همراه مدولاتور بچرخد.

در جعبه‌دنده‌های هم‌محور ساده تعداد مدولاتورها Ns از فرمول (1) و نسبت دنده‌ها G_r نوع اول از فرمول (2) و $\acute{G}_r$ برای جعبه‌دنده نوع دوم از فرمول (3) محاسبه می‌شوند (P_h تعداد جفت قطب آهنربای روتور دور بالا و P_l تعداد جفت قطب آهنربای روتور دور پایین ω_h سرعت زاویه‌ای روتور سرعت‌بالا ω_l سرعت زاویه‌ای روتور سرعت‌پایین ω_s سرعت زاویه‌ای مدولاتور).

$$N_s = P_h + P_l \quad (1)$$

$$G_r = \frac{P_l}{P_h} = \frac{\omega_h}{\omega_l} \quad (2)$$

$$\acute{G}_r = \frac{N_s}{P_h} = \frac{\omega_h}{\omega_s} \quad (3)$$

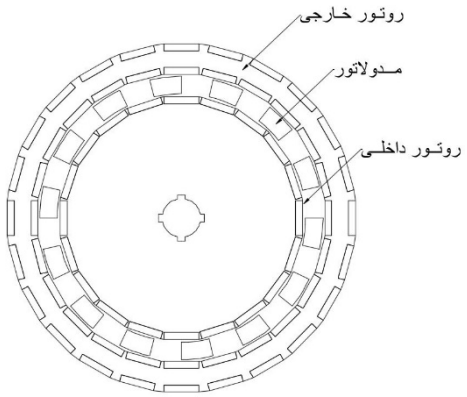
در این نوع جعبه‌دنده‌ها نیروی گشتاور دندانه‌ای[7] در هر موقعیت از رابطه شماره (4) برای هر روتور محاسبه می‌شود در این رابطه $T(\theta)$ گشتاور زاویه‌ای و $W(\theta)$ انرژی مغناطیسی می‌باشد.

$$T(\theta) = -\frac{\partial W(\theta)}{\partial \theta} \quad (4)$$

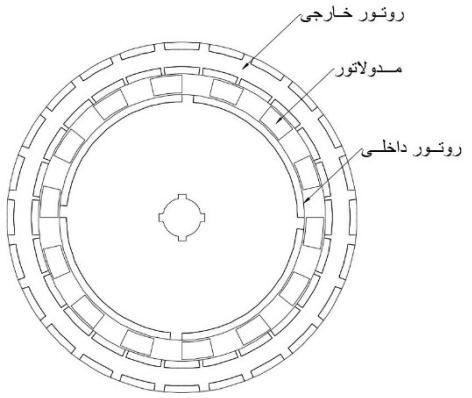
در اینجا فرض می‌شود انرژی مغناطیسی در فاصله هوایی ذخیره‌شده است و مقدار انرژی مغناطیسی از رابطه شماره (5) محاسبه می‌شود که در این رابطه مقدار μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی در خلأ، V حجم فاصله هوایی و B چگالی شار مغناطیسی در شکاف هوایی می‌باشد.[6]

$$W(\theta) = \frac{1}{2\mu_0}\int_V B^2 dV \quad (5)$$

طرح قابل ساخت در شکل 1 و طرح ایده آل در شکل 2 قابل‌مشاهده می‌باشند. مشخصات کلی دو نمونه در جدول 1 به تفکیک آورده شده است. با توجه به شکل‌های 1 و 2 و همچنین رابطه شماره (5) حجم آهن‌ربا و نوع آن یکسان در نظر گرفته شده است و تنها تفاوت تغییرات جانمایی آهن‌ربا می باشد از طرفی سعی بر آن شده است تا طراحی ایده آل و طراحی قابل ساخت باضخامت آهن‌ربای یکسانی قرار گیرد، البته در این پژوهش مانند پژوهش آکسای و همکاران آهن‌رباها در دو طراحی با یک‌فاصله مساوی فاصله‌دار شده‌اند.[7]



شکل 1: طراحی قابل ساخت



شکل 2: طراحی ایده آل

جدول 1: مشخصات ابعادی دو طرح

ردیف	شرح	واحد	مقدار
1	جفت قطب روتور سرعت‌بالا	عدد	2
2	جفت قطب استاتور سرعت‌پایین	عدد	12
3	مدولاتور	عدد	14
4	حداقل فاصله هوایی	میلی‌متر	0.5
5	شعاع شفت	میلی‌متر	5.5
6	شعاع داخلی روتور سرعت‌بالا	میلی‌متر	32.64
7	شعاع خارجی روتور سرعت‌بالا	میلی‌متر	35
8	شعاع داخلی مدولاتور	میلی‌متر	35.5
9	شعاع خارجی مدولاتور	میلی‌متر	40.5
10	شعاع داخلی روتور سرعت‌پایین	میلی‌متر	41
11	شعاع خارجی روتور سرعت‌پایین	میلی‌متر	50

دو طراحی در دو مد مغناطیسی ایستایی[8] و مغناطیسی دینامیکی[9] با سرعت‌های ثابت مدولاتور و روتور داخلی در نرم‌افزار المان محدود شبیه‌سازی‌شده‌اند.

[7] Cogging torque

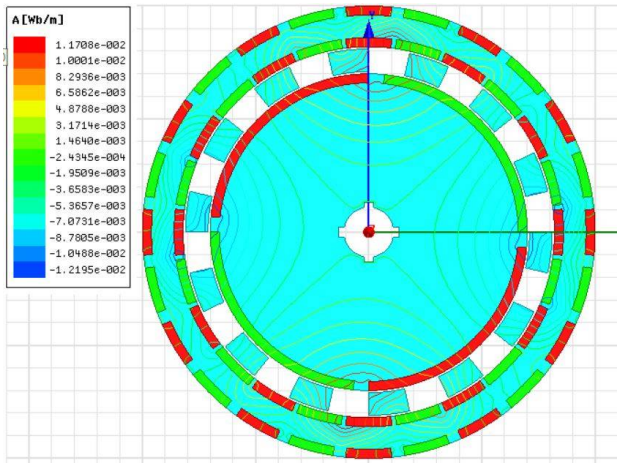
[8] Magneto static

شرایط مش بندی برای طرح‌ها یکسان در نظر گرفته‌شده است و با توجه نسبت دنده 1 به 7 ، سرعت چرخش روتور سرعت‌پایین 10 و سرعت روتور سرعت‌بالا 70 دور بر دقیقه تعیین گردیده است، نکته قابل‌ذکر با توجه به یکسان بودن و تغییر نکردن تعداد مدولاتورها و آهن‌رباها بر اساس فرمول (1) و (2) نسبت دنده‌ها یکسان بوده و تغییر نمی‌کند ولی شار و گشتاور مقدار متفاوتی را دارا می‌باشند. همچنین جهت دقت بیشتر زاویه شروع دو طراحی یکسان در نظر گرفته‌شده است.

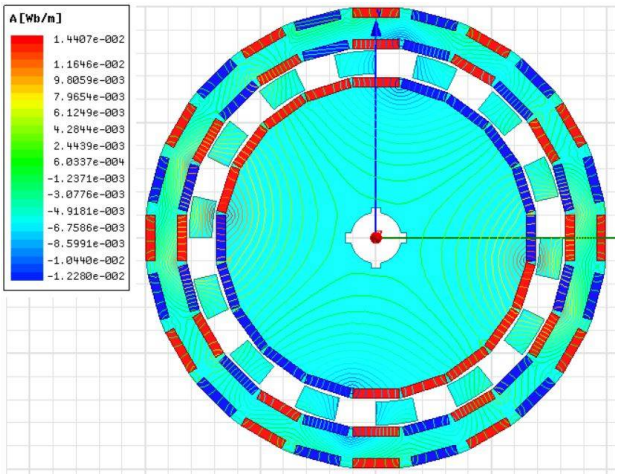
طول زمان در نظر گرفته‌شده برای شبیه‌سازی دینامیکی 3 ثانیه و با نمونه‌برداری 0.001 ثانیه بوده است. نرم‌افزار المان محدود مورداستفاده Ansys Maxwell نسخه 16 می‌باشد، تمامی طرح‌ها در مختصات دوبعدی ترسیم و موردبررسی قرارگرفته‌اند.

نتایج

نتایج شار الکترومغناطیسی حاصله در حالت ایستایی، برای نمونه ایده آل در شکل 3 و برای نمونه قابل ساخت در شکل شماره 4 آورده شده است.

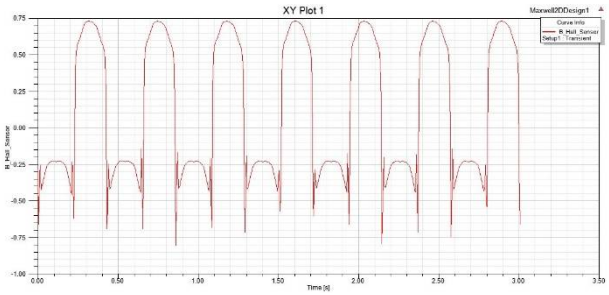


شکل 3: خطوط شار مغناطیسی ایستایی نمونه ایده آل

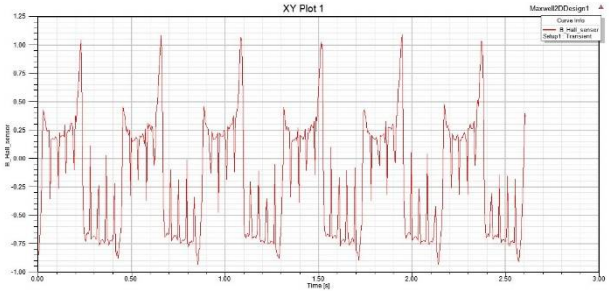


شکل 4: خطوط شار مغناطیسی ایستایی نمونه قابل ساخت

همچنین شار الکترومغناطیسی ثبت‌شده در سنسور اثر حال واقع در بین روتورداخلی و مدولاتور در حالت دینامیکی برای طراحی ایده آل و طراحی قابل ساخت به ترتیب در نمودار 1 و 2 آورده شده است.



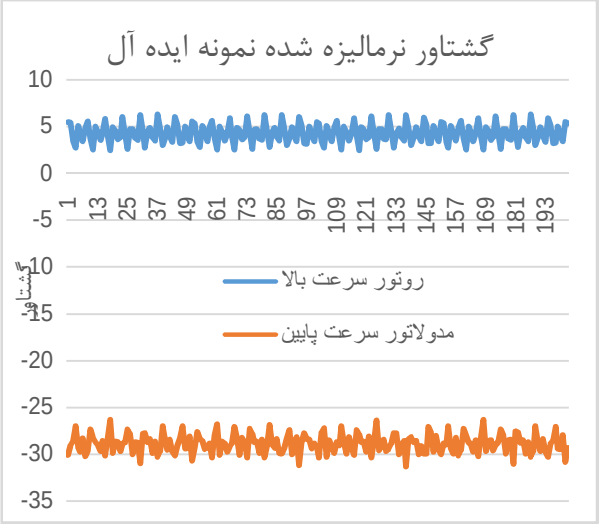
نمودار 1 : خطوط شار مغناطیسی دینامیکی نمونه ایده آل



نمودار 2 : خطوط شار مغناطیسی دینامیکی نمونه قابل ساخت

مشخصاً با در نظر گرفتن خطوط شار نمودار 1 ، شاهد نوساناتی در شار عبوری از سنسور اثر حال نمونه قابل ساخت خواهیم بود، البته بیشینه شار عبوری از حالت ایدئال بیشتر بوده است و در این حالت تصمیم‌گیری در مورد تغییرات گشتاور کمی سخت خواهد بود.

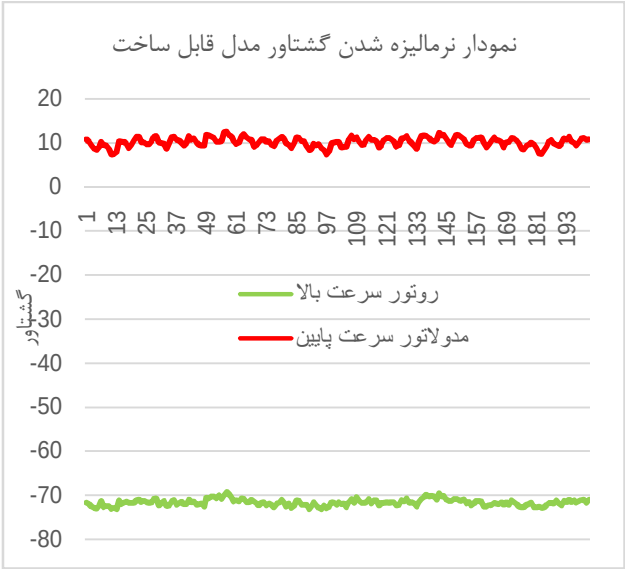
مقدار گشتاور خروجی در نمونه ایده آل و نمونه قابل ساخت به‌صورت نرمالیزه شده در نمودار 3 و 4 آورده شده است.



نمودار 3 : گشتاور خروجی به‌صورت نرمالیزه شده برای 200 نمونه اول

مقدار میانگین گشتاورهای روتورداخلی و مدولاتور در هر دو طراحی به همراه مقدار پراکندگی میانگین در جداول 2 و 3 آورده شده است.

[9]Transient



نمودار 4 : گشتاور خروجی به‌صورت نرمالیزه شده برای 200 نمونه اول

جدول 2: مقدار میانگین و پراکندگی گشتاورهای خروجی و ورودی به طرح ایده آل

ردیف	شرح	مقدار (N/m)
1	گشتاور میانگین روتور داخلی	4.27
2	پراکندگی میانگین روتور داخلی	4.73
3	گشتاور میانگین مدولاتور	-28.83
4	پراکندگی میانگین مدولاتور	6.40

جدول 3: مقدار میانگین و پراکندگی گشتاورهای خروجی و ورودی به طرح قابل ساخت

ردیف	شرح	مقدار (N/m)
1	گشتاور میانگین روتور داخلی	10.23
2	پراکندگی میانگین روتور داخلی	18.16
3	گشتاور میانگین مدولاتور	-81.87
4	پراکندگی میانگین مدولاتور	18.16

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

با توجه به تغییر جهت‌گیری مغناطیسی آهن‌ربا از نوع شار شعاعی به نوع شار تخت و استفاده از بلوک‌های کوچک به‌جای استفاده از بلوک‌های پیوسته با حجم یکسان، شاهد رفتاری عکس بودیم.

در این حال شار خروجی حالت ایستایی و حالت دینامیکی در نمونه قابل ساخت از نمونه ایده آل بیشتری بوده است اما با پراکندگی بیشتر، همچنین در مورد گشتاور شاهد افزایش گشتاور قابل‌تحمل در نمونه قابل ساخت نسبت به نمونه ایده آل بودیم البته پراکندگی در نمونه قابل ساخت تقریباً سه برابر نمونه آیده آل بوده است.

مراجع و منابع

[1] *Tsurumoto, K., & Kikuchi, S. (1987). A new magnetic gear using permanent magnet. IEEE Transactions on Magnetics, 23(5), 3622-3624.*

[2] Author, A., 1986. *Book Name*. Publisher Name, Address.

[3] Rasmussen, P. O., Andersen, T. O., Jorgensen, F. T., & Nielsen, O. (2005). Development of a high-performance magnetic gear. IEEE transactions on industry applications, 41(3), 764-770.

[4] Frank, N. W., & Toliyat, H. A. (2009, May). Gearing ratios of a magnetic gear for wind turbines. In Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC'09. IEEE International (pp. 1224-1230). IEEE.

[5] Frank, N. W., & Toliyat, H. A. (2011). Analysis of the concentric planetary magnetic gear with strengthened stator and interior permanent magnet inner rotor. IEEE Transactions on Industry Applications, 47(4), 1652-1660.

[6] Niguchi, N., Hirata, K., Muramatsu, M., & Hayakawa, Y. (2010, September). Transmission torque characteristics in a magnetic gear. In Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on (pp. 1-6). IEEE.

[7] Akcay, Y., Cox, T., & Costabeber, A. (2017, August). Improving magnetic gear overload torque with cage rotor bars. In Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2017 20th International Conference on (pp. 1-5). IEEE.

گروه مپنا

انجمن مهندسان مکانیک ایران

ISME 2019

بیست و هفتمین کنفرانس سالانه بین المللی
انجمن مهندسان مکانیک ایران
و
هفتمین کنفرانس صنعت نیروگاه های حرارتی

۱۰-۱۲ اردیبهشت ۱۳۹۸
تهران

گواهی ارائه مقاله

بدینوسیله گواهی می شود که مقاله با عنوان:

«بررسی یک نمونه گیربکس مغناطیسی هم‌محور در نمونه ایده‌آل و نمونه قابل ساخت به کمک نرم‌افزار المان محدود»

توسط نویسندگان:

«رسول لطفی، علی جباری، حسن مرادزاده ، علی‌اصغر قدیمی»

در بیست و هفتمین کنفرانس سالانه بین المللی انجمن مهندسان مکانیک ایران (ISME 2019) و هفتمین کنفرانس صنعت نیروگاه های حرارتی که در تاریخ ۱۰ تا ۱۲ اردیبهشت ۱۳۹۸ در تهران و توسط انجمن مهندسان مکانیک ایران و گروه مپنا برگزار شد، ارائه شده است. کمیته علمی همایش از حضور این عزیزان قدردانی نموده و آرزوی توفیق روزافزون برای آنان دارد.

دکتر حامد احمدی
دبیر علمی

بیست و هفتمین کنفرانس سالانه بین المللی
انجمن مهندسان مکانیک ایران
و هفتمین کنفرانس
صنعت نیروگاه‌های حرارتی
۱۰-۱۲ اردیبهشت ۱۳۹۸
ایران - تهران
ISME 2019

دکتر غلامحسین لیاقت
دبیر همایش